



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PRO MIKRO-FRÉZOVÁNÍ

CUTTING TOOLS MANUFACTURING FOR MICRO-MILLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Tkadlec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Žídek

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jiří Tkadlec**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Žídek**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba řezných nástrojů pro mikro-frézování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mikro-frézování je moderní způsob výroby součástí pro letecký průmysl, biomedicínu, elektroniku a optické systémy jejichž finální velikost je v řádu milimetrů. Výroba se potýká se problémy jako je např. size effect a tvorba otřepů.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na mikro-frézování. V rámci bakalářské práce bude zpracován přehled z vybrané výrobní technologie obsahující základní informace a nejnovější poznatky.

Seznam doporučené literatury:

CHENG, K., HUO, D. Micro cutting: fundamentals and applications. New York: John Wiley & Sons Inc., 2013.

CÂMARA, M.A., J.C. Campos RUBIO, A.M. ABRÃO a J.P. DAVIM. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. Journal of Materials Science & Technology [online]. 2012, 28(8), 673-685 [cit. 2016-12-06]. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60115-7. ISSN 10050302. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030212601157>.

RYSAVA, Z., S. BRUSCHI, S. CARMIGNATO, F. MEDEOSSO, E. SAVIO a F. ZANINI. Micro-drilling and Threading of the Ti6Al4V Titanium Alloy Produced through Additive Manufacturing. Procedia CIRP. 2016, 46, 583-586. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.030. ISSN 22128271. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116301858>.

BRUSCHI, S., G. TRISTO, Z. RYSAVA, P.F. BARIANI, D. UMBRELLO a L. DE CHIFFRE.
Environmentally clean micromilling of electron beam melted Ti6Al4V. Journal of Cleaner Production.
2016, 133, 932-941. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.035. ISSN 09596526. Dostupné také z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616307107>.

HANSEN, H.N., K. CARNEIRO, H. HAITJEMA a L. DE CHIFFRE. Dimensional Micro and Nano
Metrology. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2006, 55(2), 721-743. DOI:
10.1016/j.cirp.2006.10.005. ISSN 00078506. Dostupné také z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1660277306000065>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřená na rešeršní rozbor problematiky mikro-obrábění se zaměřením na mikro-frézování a výrobu řezných nástrojů pro mikro-frézování. Úvodem je základní analýza mikro-obrábění, specifikace mikro-frézování a její využití. Hlavním cílem práce je rozbor výroby řezných nástrojů a jejich materiálů pro mikro-frézování.

Klíčová slova

Mikro-obrábění, mikro-frézování, řezné-nástroje, řezné materiály, výroba nástrojů

ABSTRACT

This bachelor work is focused on the research of the problems of micro-cutting, exactly of micro-milling and manufacturing of cutting tools. The introduction contains basic analysis of micro-milling and specification of micro-milling. The main aim of this work is analysis of the manufacturing of cutting tools and analysis of cutting tools materials used for micro-milling.

Key words

Micro-cutting, micro-milling, cutting tools, cutting materials, manufacturing tools

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TKADLEC, J. *Výroba řezných nástrojů pro mikro-frézování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Žídek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba řezných nástrojů pro mikro-frézování vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23. 5. 2017

Datum

Jiří Tkadlec

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Janu Žídkovi za cenné připomínky a rady při vypracování mé bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 ZÁKLADNÍ ROZBOR MIKRO-OBŘÁBĚNÍ	10
1.1 Metody mikro-obřábění	11
1.1.1 Mikro-frézování	11
1.1.2 Mikro-vrtání.....	11
1.1.3 Mikro-soustružení	11
1.1.4 Mikro-broušení	12
2 „SIZE EFFECT“ (VELIKOSTNÍ EFEKT)	12
3 Mikro-frézování	14
3.1 Definice	14
3.2 Stroje pro mikro-frézování	14
3.3 Silové vlivy u mikro-frézování	15
3.4 Aplikace mikro-frézování	17
4 SIMULACE PRŮBĚHU NAPĚTÍ A DEFORMACÍ.....	18
4.1 FEM metoda.....	18
4.2 SPH metoda.....	18
5 VÝROBA NÁSTROJŮ PRO MIKRO-FRÉZOVÁNÍ.....	18
5.1 Výroba nástrojů broušením	19
5.1.1 Princip broušení	19
5.2 „FOCUSED ION BEAM METHOD“ (METODA FOKUSOVANÉHO IONTOVÉHO SVAZKU)	21
5.2.1 Základní princip fokusované svazku	21
5.2.2 Zařízení a systémy FIB	23
5.3 „Electric Discharge Machining“ (Elektroerozivní obřábění).....	25
5.3.1 Základní princip EDM	25
5.3.2 Stroje pro EDM.....	27
5.3.3 Výhody a nevýhody EDM	27
5.4 Povlakování.....	28
6 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	29
6.1 Materiálové vlastnosti	29

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	8
---------	------------------	------	---

6.2	Nástrojové oceli	30
6.3	Slinuté karbidy	31
6.4	Řezná keramika	31
6.5	Cermety	31
6.6	Diamant	32
6.7	Kubický nitrid bóru	32
ZÁVĚR		33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		34
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		37

ÚVOD

Technologie mikro-obrábění s nástupem výpočetní techniky nabrala za poslední desetiletí velký pokrok. Patří do skupiny třískového obrábění. Od konvenčního obrábění se liší hloubkou odebírané třísky, která je v řádu tisícín milimetru. Ačkoliv se jedná o relativně novou technologii, má velké uplatnění v mnoha odvětví, jako je například letecký průmysl, optika, biomedicína a elektrotechnika.

Existují 4 základní druhy mikro-obrábění. U mikro-frézování nástroj koná hlavní řezný pohyb a je možno vytvářet obecné prostorové plochy. Mikro-vrtáním se zhotovují otvory o průměru setin až desetin milimetru. Mikro-soustružení se vyznačuje tím, že hlavní řezný pohyb vykonává obrobek a hlavním cílem je zhotovování převážně rotačních ploch. Nástroj u mikro-broušení se odlišuje od jiných tím, že nemá přesně definovanou geometrii bříty. Aplikuje se především u tvrdých materiálů a jako dokončovací operace.

Při mikro-obrábění může nastat problém nazývaný velikostní efekt. Důležitým parametrem pro tento efekt je poloměr špičky ostří nástroje, který určuje minimální hloubku řezu. Pro správné určení řezných podmínek a volbu nástroje se průběh napětí a deformací předpovídá pomocí numerických metod jako je například FEM nebo SPH metoda.

Hlavní část této práce se zabývá problematikou výroby řezných nástrojů. Základní metodou výroby nástrojů je technologie broušení. Jedná se o obdobu konvenčního broušení. Relativně nový způsob mikro-obrábění je metoda fokusovaného iontového svazku. Základem je usměrňování toku urychlených iontů na obráběné místo, kde způsobují vyražení atomů z materiálů. Tím je dosaženo potřebného tvaru součástí. Poměrně rozšířenou metodou je elektroerozivní obrábění. Princip spočívá v odebírání materiálu vlivem elektrické energie, kdy se materiál odpařuje a je odváděn ve formě malých třísek. Pro zlepšení vlastností nástrojů se na povrch nanáší povlaky různých tvrdých materiálů.

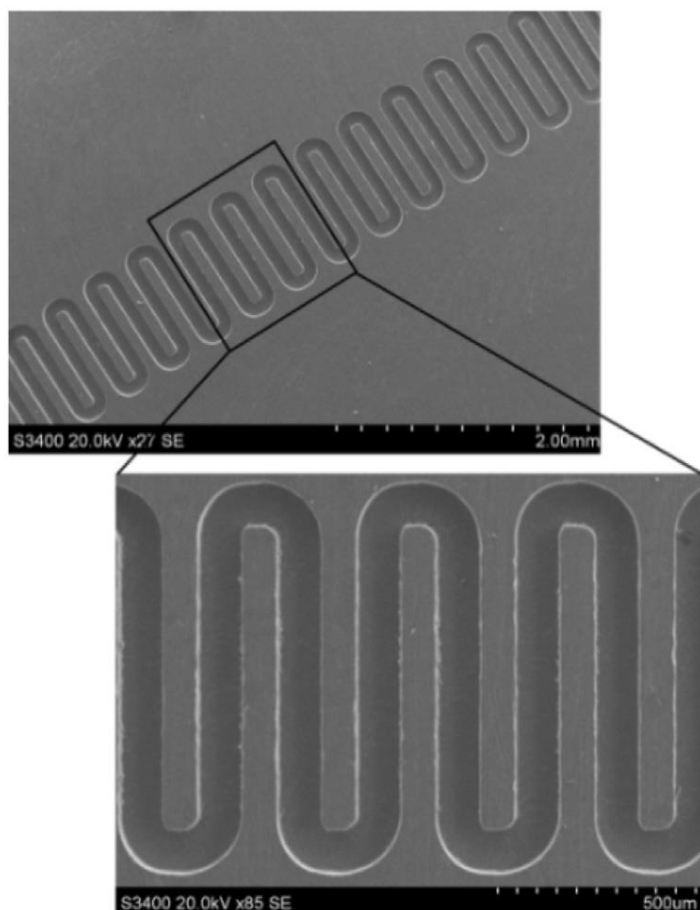
V závěrečné části jsou popisovány materiály pro výrobu řezných nástrojů, jako jsou například nástrojové oceli nebo slinuté karbidy.

1 ZÁKLADNÍ ROZBOR MIKRO-OBŘÁBĚNÍ

Obrábění je technologický proces výroby součástí, při kterém se výsledného tvaru součásti dosahuje odebráním materiálu za pomoci nástroje. Patří do kategorie třískového obrábění. Základem třískového obrábění je tvorba třísky, která se utváří při vnikání břitu nástroje do materiálu. Hlavní řezný pohyb koná ve většině případů nástroj.

Mikro-obrábění oproti běžnému obrábění je zaměřeno na výrobu součástí, jejíž konečné rozměry jsou v řádu několika milimetrů. Je to důležitá proces pro rozvoj mikrotechnologie a nanotechnologie [1].

Hlavní uplatnění této technologie je v oblasti biomedicíny, optiky, leteckého průmyslu a elektroniky. V hodinářském průmyslu se vyrábí mikro-obráběním velké množství vnitřních částí mechanických hodinek. Například ozubená kola, západky a oscilátory. V automobilovém průmyslu se využívá mikro vrtání pro výrobu vstřikovacích trysek do spalovacích motorů. Průměr vstřikovacích otvorů se pohybuje okolo 0,15 mm.



Obr. 1.1 „Hadovitá“ drážka vyrobená mikro-frézováním [3].

1.1 Metody mikro-obrábění

Stejně jako u konvenčního třískového obrábění, lze rozlišit mikro-obrábění podle nástroje a rezných pohybů na 4 základní druhy:

- mikro-frézování
- mikro-vrtání
- mikro-soustružení
- mikro-broušení

1.1.1 Mikro-frézování

Mikro-frézování je způsob výroby součástí, při kterém hlavní rezný pohyb koná nástroj a upnutý obrobek se pohybuje vůči nástroji. Stroj se nazývá frézka. Nástrojem je mikro-fréza, která je upnuta ve vřetenu stroje.

Mikro-frézování je univerzální metoda. Zahrnuje výrobu prostorových, rovinných, rotačních i obecných tvarových ploch. Mikro-obráběcí nástroje mají průměry v rozsahu od 25 μm do 1000 μm [1].

1.1.2 Mikro-vrtání

Mikro-vrtání zahrnuje výrobu děr, jejíž průměr dosahuje řádu několika setin milimetru. Hlavní i vedlejší rezný pohyb koná zpravidla nástroj. Nástroj se nazývá vrták, který má reznou část stejného průměru, jako je vrtaná díra. Upínací část má větší průměr pro snadnější upínání. Oproti frézovacím a soustružnickým nástrojům má nástroj pro vrtání děr mnohem složitější geometrii. Maximální otáčky vřetene mohou být více než 100 000 za minutu [1]. Mikro-vrtání je využíváno především ve zdravotnictví a výroba vstříkovacích trysek.

1.1.3 Mikro-soustružení

Mikro-soustružení je způsob výroby rotačních součástí. Výroba zahrnuje vytváření převážně rotačních ploch, ale je možno vyrábět rovinné plochy. Hlavní rezný pohyb koná obrobek, který je pomocí upínacího přípravku ukotven k vřetenu stroje. Vedlejší rezný pohyb vykonává nástroj upnutý v nožové hlavě. Stroj se nazývá soustruh a nástrojem se soustružnický nůž. Při zhotovování otvorů může být nástrojem i vrták.

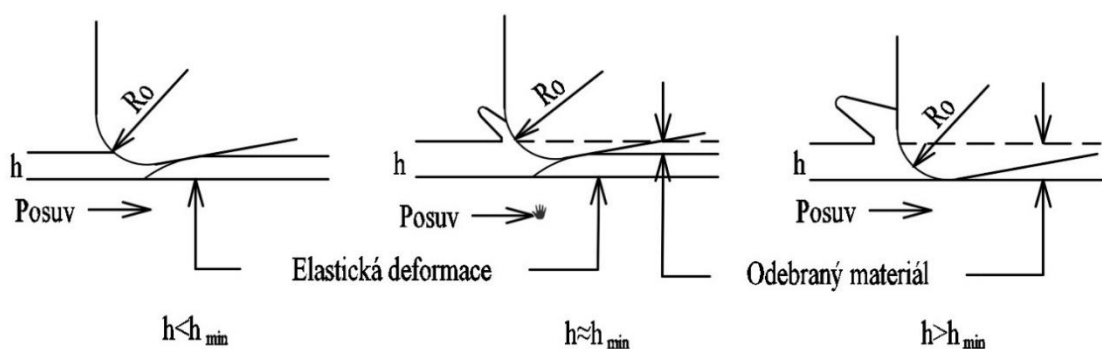
Typický příkladem je výroba mikro-hřídelů, kolíků s rozměry od $\varnothing 5 \mu\text{m}$ až po $\varnothing 100 \mu\text{m}$. Dosažitelná struktura povrchu je Ra 0.1 μm . Největší problém, který u mikro-soustružení nastává, je rezná síla. Ta má snahu ohýbat ohýbat obráběnou plochu a vychylovat jí od osy otáčení [1].

1.1.4 Mikro-broušení

Mikro-broušení se od ostatních technologií liší odlišným typem nástroje, který je mnohobřitý a nemá specifikovanou geometrii jednotlivých brousících zrn. Tato technologie je převážně používána jako dokončovací operace a vyznačuje se nízkou strukturou povrchu, která může být i menší jak $R_a 10 \text{ nm}$. Dalším typickým příkladem je výroba nástrojů pro ostatní typy mikro-obrábění. Mikro-broušení se také uplatňuje například u křehkých a tvrdých materiálů, kde není možné použít jinou technologii. Nejčastěji to jsou kalené materiály nebo materiály na bázi slinutých karbidů a keramiky [1].

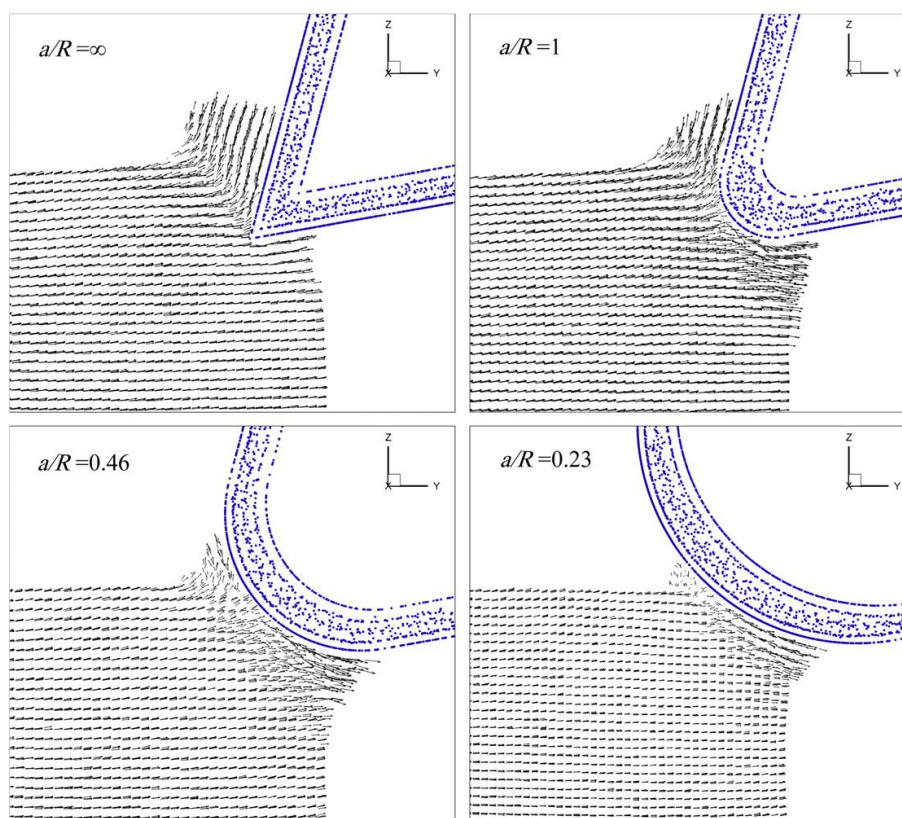
2 „SIZE EFFECT“ (VELIKOSTNÍ EFEKT)

Jeden ze zásadních problémů, který nastává u mikro-obrábění, se nazývá „size effect“. Hlavním parametrem nástroje pro mikro-obrábění je poloměr špičky ostří nástroje. Důležitý je poměr mezi poloměrem špičky ostří nástroje v ortogonální nástrojové rovině a hloubkou řezu. Pokud se dostane na kritickou hodnotu, výsledkem je, že nastává obrábění při vysoce negativní úhel čela [1]. V takovém případě se netvoří tříska, ale materiál obrobku je vtlačován pod nástroj. Tento efekt nastává, pokud je hloubka řezu v rozmezí 22% až 36% poloměru ostří nástroje. Pokud je hloubka řezu větší, tvoří se tříska jen částečně a zbytek materiálu je elasticky deformován. V případě, že je hloubka řezu oproti poloměru špičky nástroje dostatečně velká, elastická deformace nenastává a všechno materiálu je odváděn ve formě třísky [3].

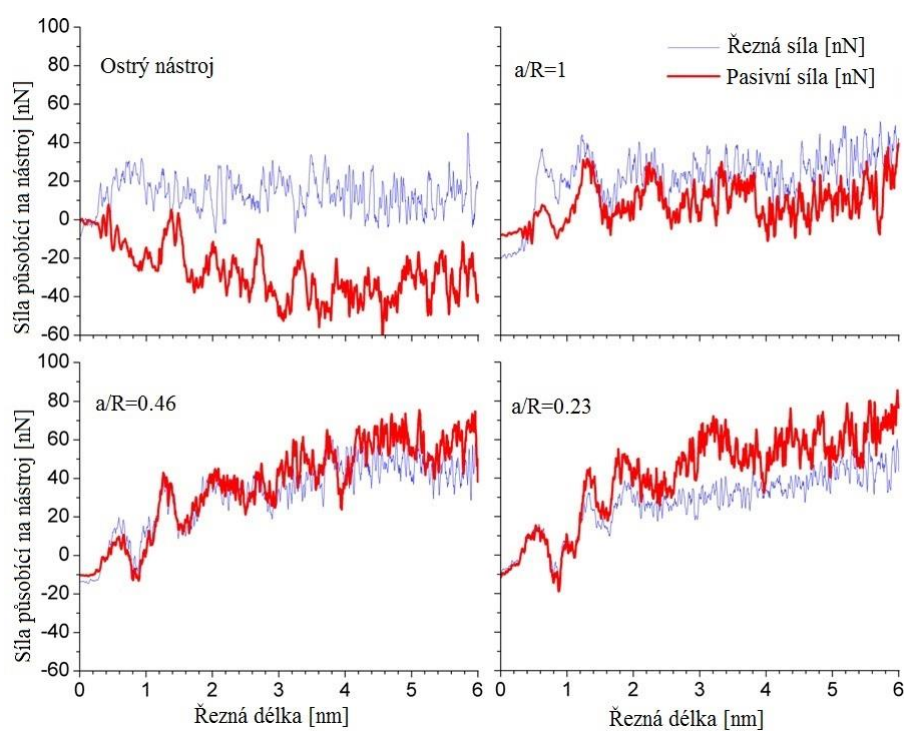


Obr. 2.1 Schéma znázorňující „size-effect“. Hloubka řezu h v závislosti na minimální hloubce řezu h_{min} pro tvorbu třísky [1].

Pro každý nástroj je důležitá minimální hloubka řezu. Ta udává, jaká musí minimální hloubka řezu, aby se tvořila tříska. Hlavní aspekt pro její velikost je poloměr špičky nástroje, ale do značné míry ji ovlivňuje i obráběný materiál.



Obr. 2.2 Tvorba třísky v závislosti na poměru hloubky řezu a poloměru ostří nástroje R [4].



Obr. 2.3 Graf znázorňující změnu řezné a pasivní síly [4].

3 MIKRO-FRÉZOVÁNÍ

3.1 Definice

Technologie mikro-frézování je univerzální metoda, kterou lze vyrábět rovinné, rotační i obecné prostorové plochy. V praxi se hovoří o mikro-frézování, pokud nástroj dosahuje průměru maximálně 1 mm. Hlavní řezný pohyb je rotační a koná jej nástroj, vůči kterému se pohybuje upnutý obrobek. Oproti konvenčnímu obrábění je mikro-frézování zaměřeno na výrobu součástí s celkovými rozměry do několika milimetrů. Na obr. 3.1 je zobrazena frézka s upnutým obrobkem.



Obr. 3.1 Ukázka upínání nástroje [5].

3.2 Stroje pro mikro-frézování

U strojů, vhodné pro mikro-frézování, je velmi důležitá jejich přesnost. Je zapotřebí, aby tyto stroje byly umístěny v místech, kde nebude jejich přesnost ovlivňována vnějšími vlivy, jako jsou například vibrace od ostatních strojů. Také není vhodné, aby se pracoviště nacházelo v oblastech, kde je frekventovaná doprava.

Základní části stroje pro mikro-frézování jsou stejné jako u strojů pro běžné frézování. Vzhledem k tomu, že průměry nástrojů jsou v řádu několika desetin milimetru, je zapotřebí, aby vřetena strojů dosahovali vysokých otáček. V případě nízkých otáček vřetena není dosažena potřeba řezná rychlost nástroje, která by se měla pohybovat mezi 50-80 m.min⁻¹, která se odvíjí od obráběného materiálu a materiálu řezného nástroje. Otáčky vřetena dosahují hodnot od 20 000 min⁻¹ až po 200 000 min⁻¹ [1]. Například pro obrábění titanu, je vhodná řezná rychlost 80 m.min⁻¹ [4]. Pro průměr nástroje 1 mm odpovídají otáčky vřetena přibližně 25 000 min⁻¹. Aby stroj byl schopen odolávat tak vysokým otáčkám, je vřeteno uloženo ve vzduchových ložiscích. Tyto ložiska nejsou vhodné pro velké síly a rázy. Při mikro-frézování jsou rázy minimální a řezné síly se pohybují v řádu několika newtonů. Proto jsou vzduchová ložiska pro vřetena strojů vyhovující [6].

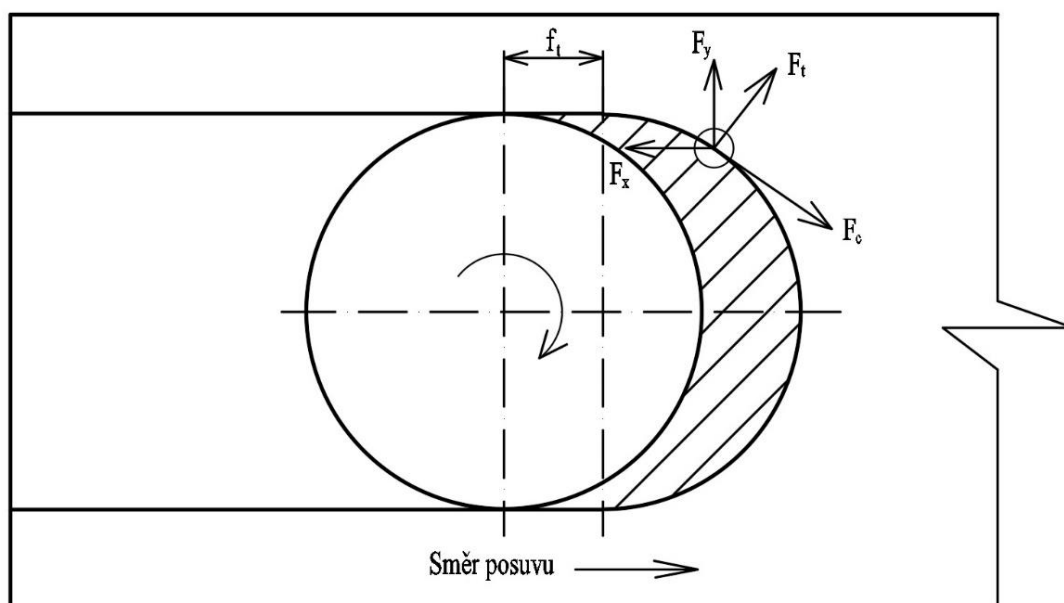
Pro řeznou rychlost, stejně jako u standartního obrábění, lze použít vztah (3.1).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

Kde: v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost
 D [mm] - průměr nástroje
 n [min⁻¹] - otáčky nástroje

3.3 Silové vlivy u mikro-frézování

Stejně jako u běžného obrábění vznikají i u mikro-frézování řezné síly, které namáhají nástroj a vychylují jej ze své polohy. Pro správnou výrobu součásti je tedy rozbor sil nezbytně nutný, aby nedošlo při výrobě k nepřesnostem nebo k poškození nástroje [7].



Obr. 3.2 Silový rozklad při mikro-frézování [6].

F_x = posuvová síla v ose x [N]
 F_y = posuvová síla v ose y [N]
 F_c = hlavní řezná síla [N]
 F_t = pasivní síla [N]
 f_z = posuv na zub [mm]

Pro stanovení teoretických přírůstků jednotlivých posuvových sil platí následující vztah (3.2) [8].

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} K_{tc} A_p(\theta) f_z \\ K_{rc} A_p(\theta) f_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{te} f_z \\ K_{re} f_z \end{bmatrix} \right) \quad (3.2)$$

Kde: dF_x [N] - přírůstek posuvové síly v ose x
 dF_y [N] - přírůstek posuvové síly v ose y
 K_{tc} [MPa] - řezný koeficient
 K_{rc} [MPa] - řezný koeficient
 K_{te} [N.mm⁻¹] - koeficient ostří
 K_{re} [N.mm⁻¹] - koeficient ostří
 A_p [mm] - hloubka obráběné plochy
 f_z [mm] - posuv na zub

Při obrábění vzniká hlavní řezná síla, kterou lze stanovit dle vztahu (3.3) [8].

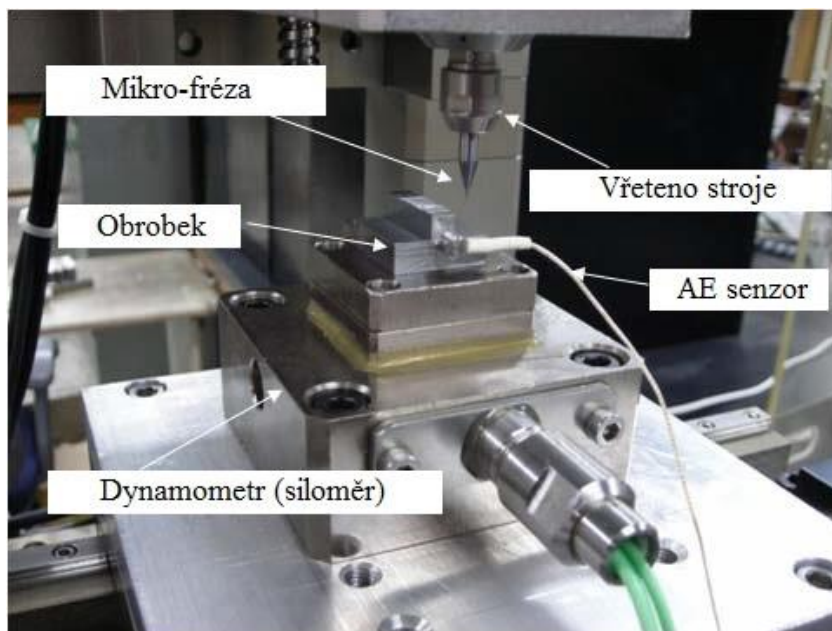
$$\begin{bmatrix} dF_{xc} \\ dF_{yc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} K_{tp} \cdot A_p \cdot f_z \\ K_{rp} \cdot A_p \cdot f_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{te} f_z \\ K_{re} f_z \end{bmatrix} \right) \quad (3.3)$$

Kde: dF_{xc} [N] - přírůstek řezné síly v ose x
 dF_{yc} [N] - přírůstek řezné síly v ose y
 K_{tp} [MPa] - řezný koeficient
 K_{rp} [MPa] - řezný koeficient
 K_{te} [N.mm⁻¹] - koeficient ostří
 K_{re} [N.mm⁻¹] - koeficient ostří
 A_p [mm] - hloubka obráběné plochy
 f_z [mm] - posuv na zub

Celková řezná síla F při mikro-obrábění může být vyjádřena vztahem (3.4).

$$\begin{aligned} F_x &= \sum dF_x + \sum dF_{xc} \\ F_y &= \sum dF_y + \sum dF_{yc} \\ F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Pro experimentální měření řezných sil se používá dynamometr, na kterém je upevněn obrobek. Dynamometr funguje principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev lze pozorovat jen u některých látek. Jedná se o schopnost krystalů generovat napětí. Intenzita elektrického pole je přímo úměrná elastické deformaci látky. Naměřená data se přesnou do počítače, kde se vyhodnocují. Na obr. 3.3 je znázorněno experimentální měření řezných sil pomocí dynamometru.



Obr. 3.3. Měření řezných sil dynamometrem [6].

3.4 Aplikace mikro-frézování

Mikro-frézování je univerzální metoda a proto má využití v mnoha oblastech. Velké uplatnění je oboru elektrotechniky, biomedicíny a letecký průmysl [1, 9].

- V medicíně se mikro-frézováním vyrábí například zubní implantáty, kyčelní protézy a kostní náhrady. Dále se využívá pro výrobu různých chirurgických nástrojů a pomůcek.
- V elektrotechnice je touto technologií velká řada miniaturních zařízení, senzorů a konektorů.
- V hodinářském průmyslu je zapotřebí vyrobit malé a velmi přesné mechanické části hodinek jako jsou ozubená kola, rohatky a západky.
- Pro optický průmysl se mikro-frézování aplikuje pro výrobu malých objektivů a drobných součástí, které jsou nezbytné pro sestavení malého optického zařízení.
- V letectví se pomocí mikro-frézování vyrábí součásti pro mikro-gyroskopy, mikro-ventily a kola planetových převodovek.
- Dalším využitím mikro-frézování je například výroba vstřikovacích trysek, komponentů pro měřicí zařízení, elektrod pro elektroerozivní obrábění a mnoho dalších součástí.

4 SIMULACE PRŮBĚHU NAPĚTÍ A DEFORMACÍ

U mikro-frézování je simulace průběhu napětí a deformace nezbytná k tomu, abychom mohli stanovit optimální řezné podmínky. Při obrábění mohou vznikat nestability řezných sil a vibrace, které ovlivňují přesnost výroby a mohou způsobit poškození nástroje. Proto je předpověď řezných sil u mikro-frézování zásadní [10].

4.1 FEM metoda

Metoda konečných prvků (FEM) je jedna z metod, jak předpovídat silové účinky působící na nástroj. Je to numerická metoda, která slouží k simulaci průběhu napětí, deformací a tepelné působení.

Základní princip metody konečných prvků je rozdělení tělesa na mnoho malých částí. Všechny tvarově složité součásti se převedou na jednoduché tvary (obdélníky, čtverce, trojúhelníky) které je možné snad matematicky popsat. Tyto části jsou spojeny v tzv. uzlech, které dohromady tvoří síť prvků. Důležitým parametrem je hustota sítě, která je přímo úměrná přesnosti výsledné analýzy. Základ se opírá o princip Lagrangeovi metody. Lze ji formulovat takto: Pro každou část, u které známe geometrii, zatížení, materiál a vazby k okolím částem, můžeme určit její deformaci a napjatost. Z obecné statiky je známo, že existuje celkem 15 neznámých parametrů a je možno tedy sestavit 15 rovnic, které je nutno doplnit okrajovými podmínky. Těmito parametry jsou [11, 12]:

- tři posuvy (u, v, w),
- šest napětí ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$),
- šest deformací ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$).

4.2 SPH metoda

SPH metoda (*smoothed particle hydrodynamic method*) je bezsítová numerická metoda založena na Lagrangerově principu. Princip spočívá v nahrazení tělesa „kuličkami“, jejichž vlastnosti jsou popsány rovnicemi. Hlavní podstata SPH spočívá v aplikování rovnic na sousedící částice. Na rozdíl od FEM, kde jsou jednotlivé body pevně spojené s tělesem. Z důvodu absence sítě tato metoda umožňuje velké deformace. Její aplikace je převážně v mechanice tekutin a pro tříštivé materiály [12].

5 VÝROBA NÁSTROJŮ PRO MIKRO-FRÉZOVÁNÍ

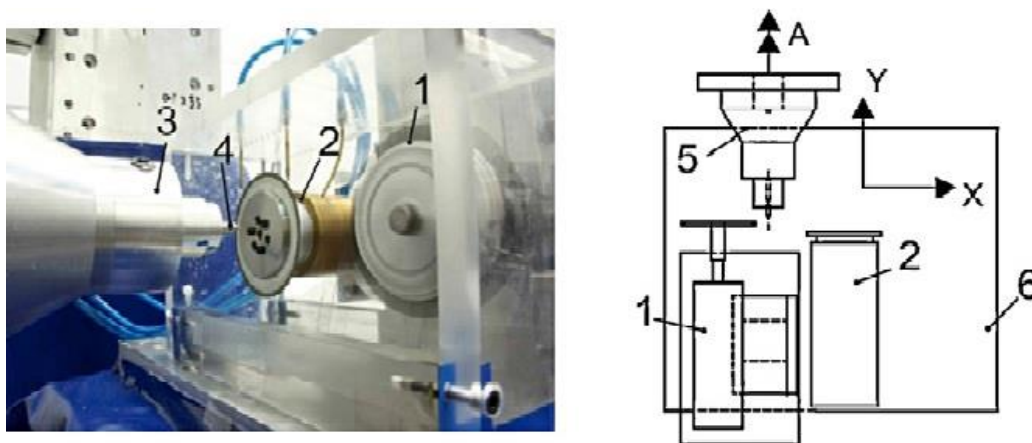
Výroba řezných nástrojů pro mikro-frézování spadá také do oblasti mikro-obrábění. Řezné nástroje musí splňovat různé parametry. Nástroj musí dobře oddělovat materiál, správně utvářet a odvádět třísku. Důležitá je geometrie břitu nástroje, aby nedošlo ke kontaktu hřbetu nástroje a obráběným materiálem [1, 13]. Jedním z nejdůležitějších parametrem u mikro-frézy je poloměr špičky ostří nástroje, aby nenastal tzv. „size effect“, který je nežádoucí (viz. kapitola 2). Mezi přední světové výrobce mikro-nástrojů patří japonská firma Kyocera (Kyoto, Japonsko).

5.1 Výroba nástrojů broušením

Nejjednodušší metoda výroby nástrojů pro mikro-frézování je broušení. Jedná se o obdobu konvenčního broušení nástrojů, ale jsou kladeny vyšší nároky na přesnost. Hlavní řezný pohyb vykonává nástroj (brousící kotouč).

5.1.1 Princip broušení

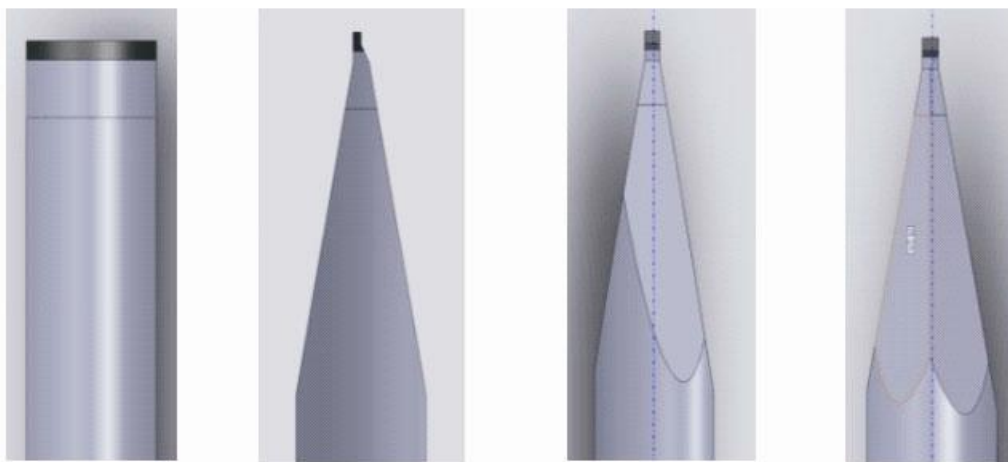
Základní princip broušení spočívá v odebírání velmi malých částí (třísek) materiálů pomocí brousícího nástroje. Ten se od jiných metod třískového obrábění liší tím, že je mnohobřitý a nemá přesně definovanou geometrii jednotlivých brousících zrn (břitů).



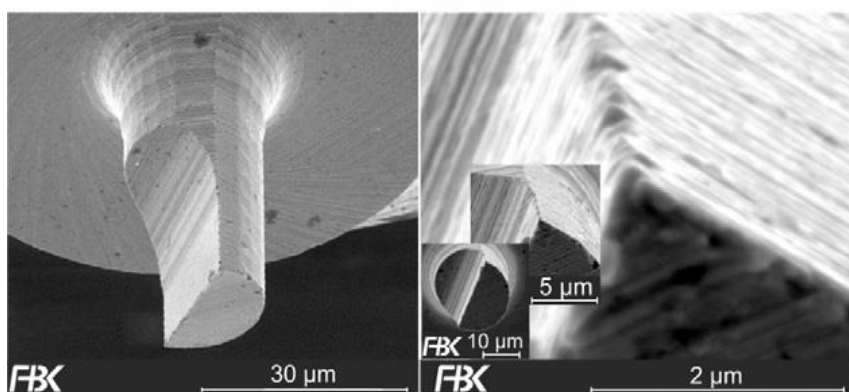
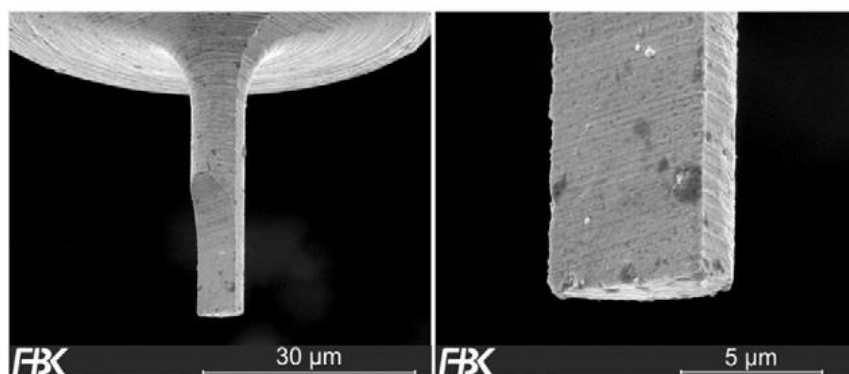
Obr. 5.1 Broušení mikro-nástrojů, 1 - hnací vřeteno, 2 - hnané vřeteno, 3 - upínací zařízení, 4 - broušený nástroj, 5 - otáčení broušeného nástroje, 6 - posuvový stůl [13].

Pro broušení je nutné zvolit vhodný brousící kotouč. Tvrdost zrn se obvykle pohybuje okolo 2000 HV a jejich průměr je přibližně 0,2 mm. Řezná rychlost brousícího kotouče je 25 m.s^{-1} až 35 m.s^{-1} [13].

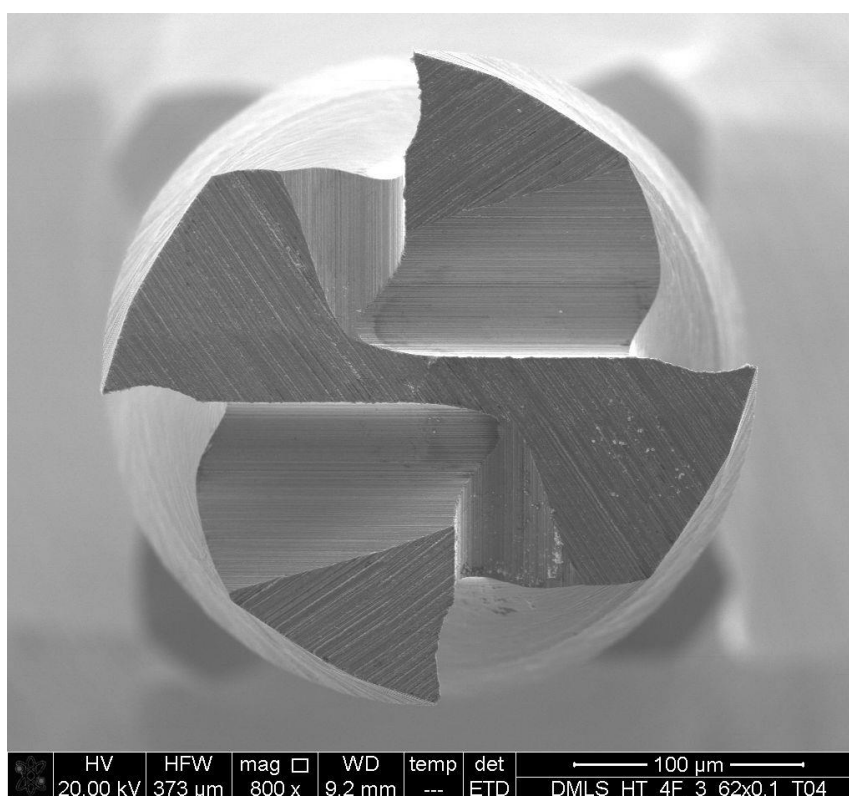
Postup výroby nástroje zobrazuje obr. 5.2. Pokud jde o nástroj se slinutým karbidem (SK), tak první fází je připájení SK na konec budoucího nástroje [14].



Obr. 5.2 Fáze výroby nástroje [14].

a) mikro-fréza D=20 μm b) mikro-fréza D=10 μm 

Obr. 5.3 Mikro-frézy vyrobené broušením [13].



Obr. 5.4 Ostří 4.břité frézy.

5.2 „*Focused ion beam method*“ (metoda fokusovaného iontového svazku)

Metoda fokusovaného iontového svazku (FIB) je metoda, kterou je možno nejen přesně obrábět, ale i zobrazovat v mikrometrové až nanometrovém měřítku. FIB metoda široký rozsah použití od výzkumu až k praktickým aplikacím. Je využívána v mnoha oblastech od elektro průmyslu, optiku přes geologii až po biomedicínu [15]. Největší výhodou této metody je vysoká přesnost výsledné součásti. Naopak nevýhodou je vysoká pořizovací cena zařízení.

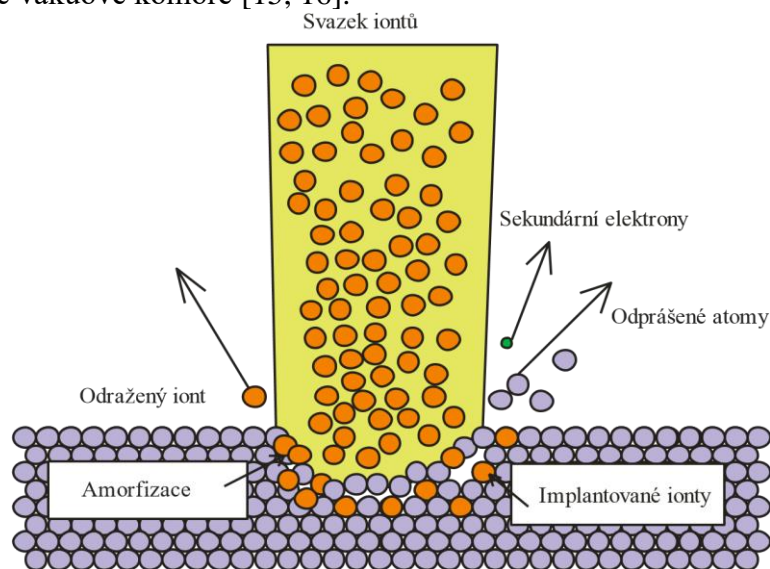
5.2.1 Základní princip fokusované svazku

Princip FIB metody spočívá v usměrňování toku ionizovaných atomů a jejich přesnému zaměřování na obráběné místo. Ionty jsou urychlovány v elektrickém poli a dopadají požadované místo na součásti. Urychlovací napětí se obvykle pohybuje v rozsahu od 5 kV do 30 kV a průměr svazku má rozsah od 1 nm až po 100 nm. Rychlost při dopadu na plochu nejvíce ovlivňuje urychlovací napětí. Při urychlovacím napětí 30 kV se docílí rychlosti přibližně 280 km/s. Dopadající ionty v místě dopadu a v jeho blízkém okolí způsobují vyrážení atomů z materiálu. Tím se dosáhne požadovaného tvaru součásti [15]. Na obr. 5.5 je zobrazeno schéma iontového tubusu.

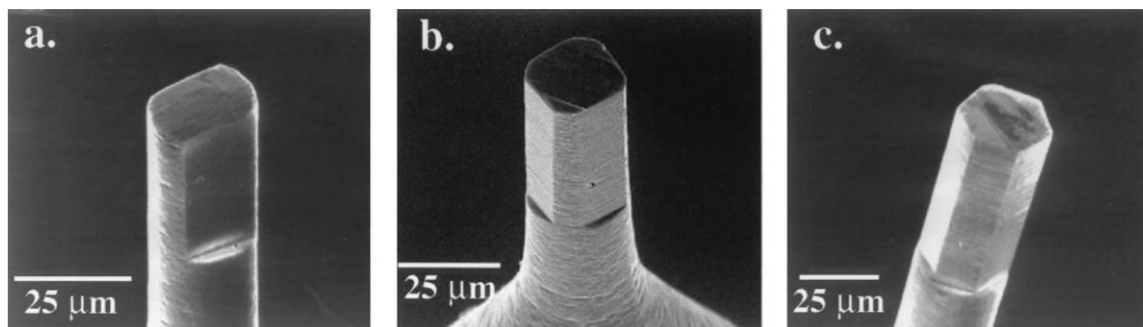


Obr. 5.5 Uspořádání optické soustavy v iontovém tubusu [15].

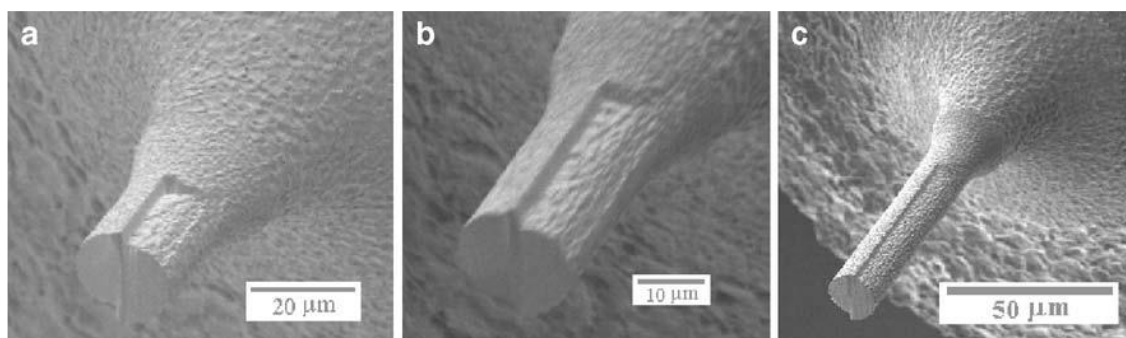
Při dopadu iontů na povrch součásti nastává několik fyzikálních jevů. Nejdůležitějším parametrem svazku je kinetická energie iontů, která je dána urychlovacím napětím. Pokud dopadne iont na povrch materiálu a nemá dostatečnou energii, ztratí část své kinetické energie, která se uvolní ve formě tepla a se zbylou kinetickou energií se odrazí do prostoru. Amorfizace je vychýlení atomů ze své rovnovážné polohy. Dále se mohou usadit ionty uvnitř materiálu. Tento jev se nazývá implantace. Nejvíce žádaný jev je odprašování atomů, kterým se dosahuje požadovaného tvaru součásti. Tyto atomy jsou nejčastěji zachycovány ve vakuové komoře [15, 16].



Obr. 5.6 Obrábění fokusovaným iontovým svazkem [16].



Obr. 5.7 Mikro-fréza vyrobena fokusovaným iontovým svazkem [17].



Obr. 5.8 Mikro-frézy o průměru 20 μm a délkou a) 25 μm, b) 50 μm, c) 90 μm [18].

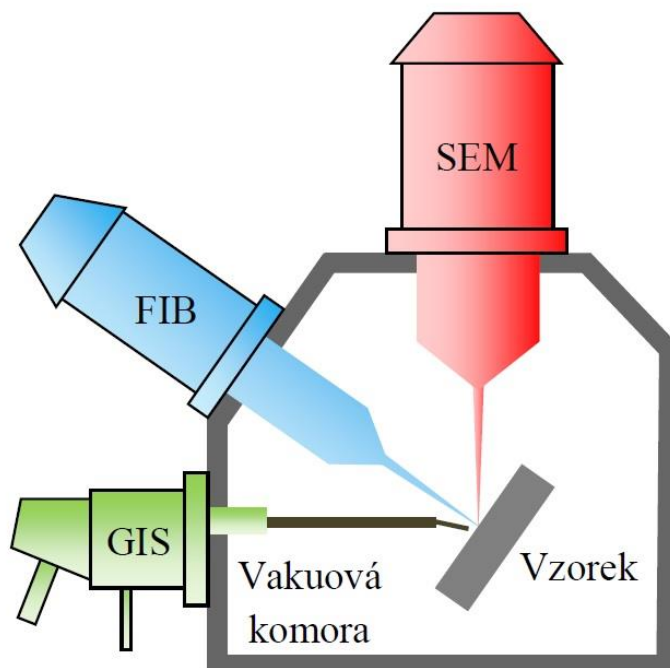
Jako zdroj iontů lze použít prakticky jakýkoliv materiál, ale v praxi jsou nejvíce upřednostňovány kovy s nízkou teplotou tání. Tyto zdroje iontů, které využívají tekutý kov, jsou označovány jako LMIS (*liquid metal ion source*). Používání slitin, jako zdroje iontů, vyžaduje nutnost použít hmotnostní oddělovač, aby bylo zamezeno výskytu různých hmotnostní a náboje ve svazku. Tím je zajištěna fokusace všech iontů do stejného místa. Mezi nejvíce preferované zdroje je gallium (Ga). Gallium poskytuje oproti jiným materiálům řadu výhod. Jednou z největších předností gallia je jeho nízká teplota tání, která je 30°C. Další výhodou iontů gallia je jejich relativně vysoká hmotnost a umožňují vyrazet i atomy těžších prvků, které materiál může obsahovat. Vysoká hmotnost iontů je také schopna přerušit i silné chemické vazby [15]. Tabulka 5.1 zobrazuje srovnání vlastností atomů gallia a elektronů.

Tab. 5.1 Srovnání atomů ve FIB a elektronů v SEM (řádkovací elektronový mikroskop) [15].

	Atom Ga	Elektron
Průměr částice	0,27 nm	0,000005 nm
Hmotnost částice	$1,2 \times 10^{-25}$ kg	$9,1 \times 10^{-31}$ kg
Rychlost částice při urychlovacím napětí 30 kV	280 km/s	100 000 km/s
Rychlost částice při urychlovacím napětí 2 kV	73 km/s	26 000 km/s
	Svazek Ga iontů ve FIB	Svazek elektronů v SEM
Průměr svazku	1-100 nm	0,1-10 nm
Obvyklé urychlovací napětí	5-30 kV	1-30 kV
Proud ve svazku	1-100 000 pA	1-100 000 pA
Hloubka vniku částice do železa při urychlovacím napětí 30 kV	střední ≈ 11 nm maximální ≈ 30 nm	střední ≈ 1100 nm maximální ≈ 3500 nm

5.2.2 Zařízení a systémy FIB

Pro správnou funkci FIB je nutné dosáhnout velmi nízkého absolutního tlaku. Proto je k zařízení připojena vakuová komora, která je schopna dosáhnout vysokého vakua. Optimální absolutní tlak by neměl být vyšší než 10^{-3} Pa. V praxi FIB používá konfiguraci s různými zařízeními. Nejvíce rozšířená je sestava iontového tubusu a elektronového tubusu. Tako kombinace označuje jako FIB-SEM (rovněž DualBeam nebo CrossBeam) a je schopna umožnit kontrolu FIB tím, že zobrazuje práci svazku pomocí SEM (řádkovací elektronový mikroskop). Jednotlivé iontové a elektronové svazky se křížují v pracovním místě obráběné součásti [19].



Obr. 5.9 Schéma systému využívající iontový a elektronový svazek (FIB-SEM) [19].



Obr. 5.10 Popis jednotlivých komponent zařízení FIB Joel JIB-4000 [15].

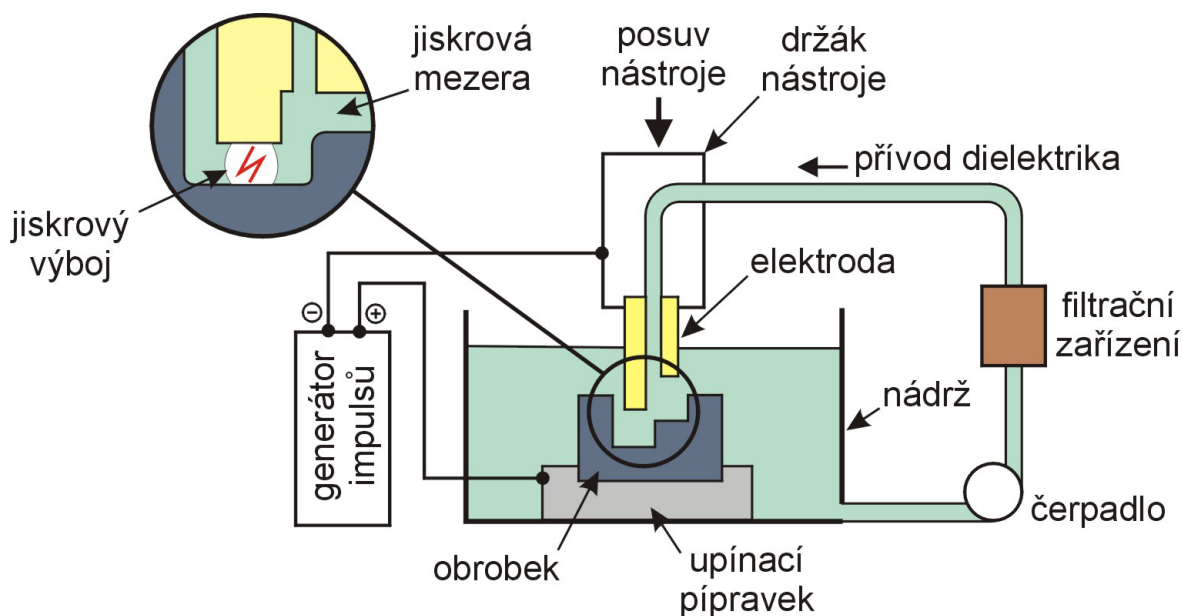
V současné době existuje na trhu 5 hlavních dodavatelů systému FIB. Spadá do nich německá firma Zeiss (Oberkochen, Německo), česko-francouzská společnost Tescan Orsay (Brno, Česká republika) a japonské firmy Hitachi (Tokyo, Japonsko) a Jeol (Akishima, Tokyo, Japonsko). Prakticky veškeré FIB přístroje, které jsou používány v České republice, jsou vyrobeny americkou firmou FEI Company (Hillsboro, Oregon, USA) [15].

5.3 „Electric Discharge Machining“ (Elektroerozivní obrábění)

Elektro erozivní obrábění (EDM) je řazena mezi nekonvenční metody obrábění. Tato metoda se nejčastěji využívá pro výrobu vstřikovacích forem na plasty, lisovacích a střižných nástrojů. Velké využití je i v oblasti zhotovování problematických tvarů, které jsou obtížně vyrobitelné jinými metodami. Pro EDM je nezbytnou podmínkou, aby byl obráběný materiál elektricky vodivý [20].

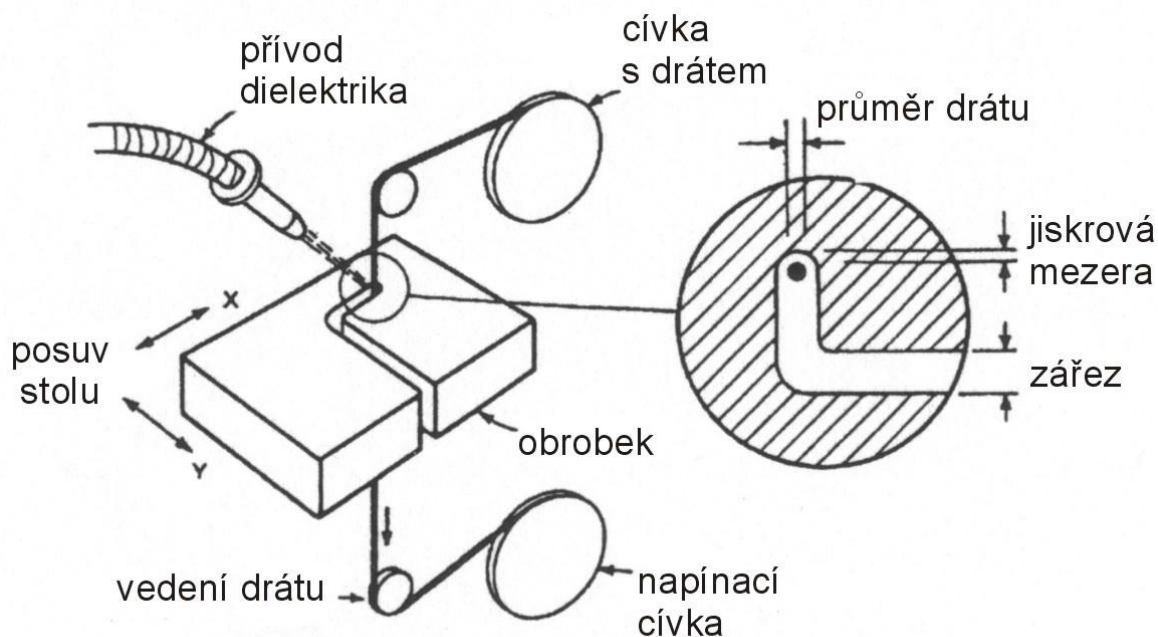
5.3.1 Základní princip EDM

Základní princip EDM je úběr materiálu vlivem elektrické energie. Mezi elektrodou (nástrojem) a obráběnou součástí se za pomoci impulsů elektrického výboje odpařují velmi malé částice. Nástroj a obrobek jsou od sebe umístěny v těsné blízkosti, ale nikdy mezi nimi nedojde ke vzájemnému kontaktu. Vzdálenost mezi nástrojem a obrobkem se nazývá jiskrová mezera a její velikost musí být v rozmezí od 0,001 až 0,1 mm [20, 21]. Je nezbytné, aby tento proces probíhal ponořený v dielektrické kapalině. Touto kapalinou bývá nejčastěji destilovaná voda, petrolej, vodní sklo a solné roztoky. Jejím hlavním úkolem je zabránění tepelného ovlivnění materiálu (odvádí teplo), odplavuje částice odebraného materiálu a ohraničuje výbojový kanál. Dielektrikum musí splňovat požadavky, jako je například chemická neutralita, nízká viskozita a dobrá smáčivost. Kapalina by taky měla být snadno dostupná [22].



Obr. 5.11 Schéma elektroerozivního obrábění [23].

Nástroj (elektroda) může mít tvar výsledné dutiny vytvořené v obrobku. Tato metoda je vhodná pro vytvoření dutiny v těžko dostupných míst, kde jiné technologie selhávají. Druhým způsobem je řezání drátovou metodou. V tomto případě je nástroj ve tvaru drátu, který se odvíjí z cívky a přes vodička se je veden k obráběnému místu. Obr 5.12 zobrazuje princip vedení a podávání drátu.



Obr. 5.12 Schéma vedení a podávání drátkové metody [23].

Při návrhu nástrojové elektrody je zapotřebí vybrat vhodný materiál. Mezi základní vlastnosti, které by měl materiál splňovat, patří dobrá elektrická vodivost, obrobitelnost, vysoký bod tání a dostatečná pevnost. Volba materiálu závisí na obráběném materiálu, potřebné jakosti součásti a vyžadované životnosti nástroje. Největší vliv na opotřebení elektrody má teplota tavení obráběného materiálu a materiál, ze kterého je elektroda vyrobena. Hlavním kritériem, podle kterého se stanovuje opotřebení elektrody a určuje její úpravu nebo výměnu, je opotřebení rohů. U drátkové metody je elektroda (drát) na jedno použití. V tabulce 5.2 jsou uvedeny základní charakteristiky nejpoužívanějších materiálů elektrod [20, 22].

Tab. 5.2 Charakteristiky materiálů elektrod [22].

Materiál	Charakteristika
Grafit	Nejpoužívanější materiál, dobře obrobitelný a nízké opotřebení, nevýhodou je znečištění stroje.
Měď	Vysoká elektrická vodivost, nízké opotřebení, vhodné pro obrábění karbidu wolframu
Měď-wolfram Stříbro-wolfram	Pro výrobu hlubokých drážek, nevýhodou je vysoká cena a křehkost elektrody.
Měď-grafit	Dražší materiál než samotný grafit, vhodný pro obrábění karbidu wolframu
Mosaz	Relativně levný materiál, snadná obrobitelnost ale vysoké opotřebení
Wolfram	Pro výrobu malých otvorů $D < 0,2$ mm

5.3.2 Stroje pro EDM

V současné době je samozřejmostí každého moderního stroje řízení pomocí počítače (CNC). U metody, kde je nástrojem elektroda ve formě drátu, jsou počítačově řízeny směry a rychlosti pohybů obrobku. Ten je upnut na pracovním stole.



Obr. 5.13 Elektroerozivní drátová řezačka Charmilles Robofil 2050SI [24].

5.3.3 Výhody a nevýhody EDM

Hlavními výhodami elektroerozivního obrábění jsou [20, 22]:

- schopnost obrábět jakýkoliv vodivý materiál bez ohledu na jeho mechanické vlastnosti,
- obrobek není mechanicky namáhán,
- možnost výroby složitějších tvarů, které by byly obtížně vyrobitelné jinými technologiemi,
- snadná automatizace výroby,
- hrany po obrábění zůstávají bez otřepů,
- široký rozsah pracovních parametrů umožňuje vytvářet různá jakosti povrchu,
- vzniklý odpad po obrábění je menší, než u konvenčních metod.

K nevýhodám EDM patří [20, 22]:

- velké náklady na zhotovení nástroje,
- při zvýšení produktivity značně poklesne jakost povrchu,
- značné nároky na zkušenost obsluhy, zejména při nastavování parametrů procesu,
- správný chod stroje můžou ovlivňovat některé signály (například radiový), proto je nutné jen umístit na vhodné místo,
- v průběhu obrábění, je nezbytné, aby byl obrobek ponořený do kapaliny,
- nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů.

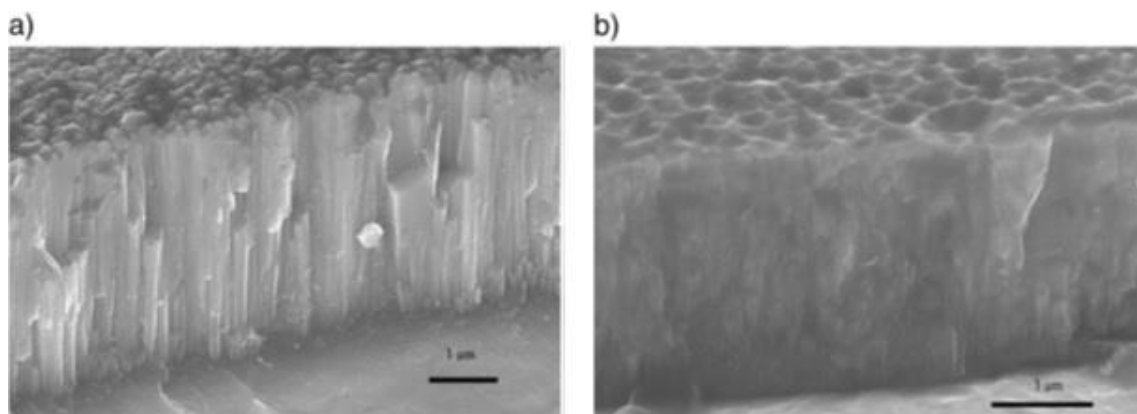
5.4 Povlakování

Pro zlepšení mechanických vlastností, převážně tvrdosti a otěruvzdornosti, se na povrch nástrojů nanáší tenká vrstva vysoce tvrdého materiálu. Nejvíce používané materiály pro povlakování je nitrid titanu (TiN), karbid titanu (TiC), oxid hliníku (Al_2O_3) a karbonitrid titanu (TiCN). U povlakování nástrojů pro mikro-frézování je nutné dbát na co nejmenší tloušťku vrstvy povlaku [25].

Základní metody povlakování jsou:

- **Metoda CVD** (Chemical Vapour Deposition) je chemické napařování probíhající za vysokých teplot (900°C - 1200°C). Výhoda této metody je možnost povlakování složitějších tvarů. CVD není vhodné pro povlakování mikro-fréz z důvodu větší vrstvy povlaku ($10\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$) a obtížnému povlakování ostrých hran [25, 26].
- **Metoda PVD** (Physical Vapour Deposition) je fyzikální napařování probíhající za nižších teplot (350°C - 600°C). Tato metoda umožňuje povlakovat i ostrých hran a tloušťka vrstvy se pohybuje okolo $5\text{ }\mu\text{m}$. Nevýhodou jsou vyšší nároky na úpravu povrchu přes procesem [25, 26].

Nejvhodnější metoda na povlakování mikro-fréz je technologie **HIPIMS** (High-power impulse magnetron sputtering). Tato technologie je relativně nová a je založena na principu PVD. Metoda spojuje magnetronové napařování a technologii pulzní energie. Hlavním účelem je zvýšit hustotu plazmatu před zdrojem rozprašování. Tím se sníží potřebná ionizační vzdálenost rozprašovaných částic. Zvýšení hustoty plazmy lze jednoduše dosáhnout vysokou elektrickou energií (v řádu $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$) [27]. Největšími výhodami HIPIMS je vysoká přilnavost a hustota filmu. Tato metoda je zvláště vhodná pro povlakování mikro-fréz, protože je možno nanášet velmi tenké vrstvy povlaku, přibližně $2\text{ }\mu\text{m}$ [28].



Obr. 5.14 Zobrazání TiAlN povlaku a) nanášený klasickou metodou, b) nanášený metodou HIPIMS [28].

6 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

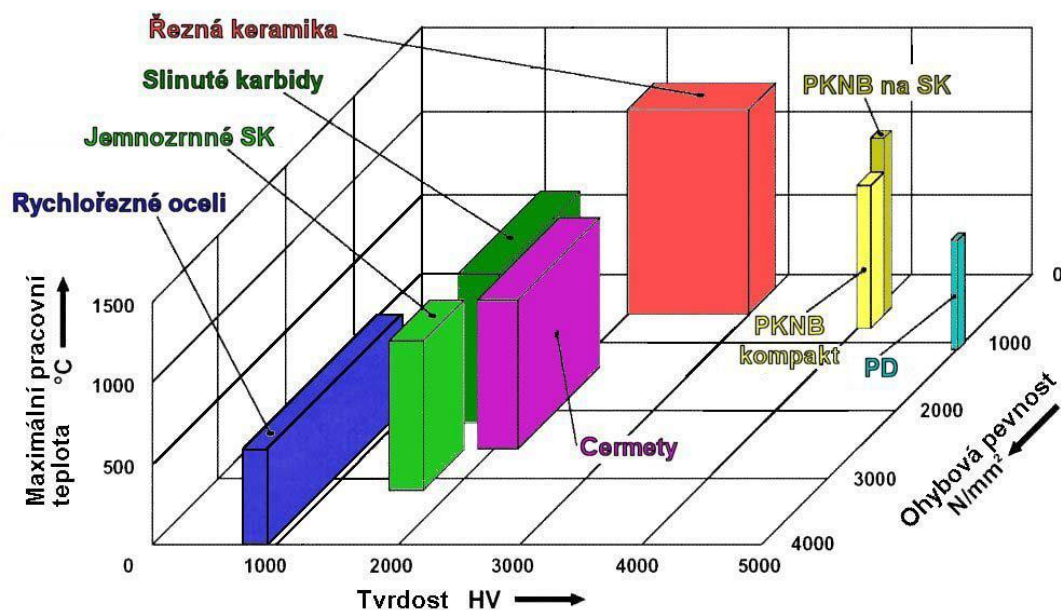
V současné době jsou dostupné různé druhy materiálů pro výrobu řezných nástrojů. S nástupem vysokých požadavků na rychlost výroby, nastal v oblasti vývoje řezných materiálů velký pokrok. Existuje řada materiálů, jako jsou například rychlořezné oceli nebo i super tvrdé řezné materiály (cermety, diamant, KNB) [26].

6.1 Materiálové vlastnosti

Nejdůležitějšími vlastnostmi pro nástrojové materiály jsou tvrdost, houževnatost a teplotní odolnost. Vhodnými povrchovými úpravami je možno zvýšit některé žádoucí vlastnosti, jako je například otěruvzdornost.

Mezi nejpoužívanější materiály patří:

- nástrojové oceli,
- slinuté karbidy,
- řezná keramika,
- cermety,
- diamant,
- kubický nitrid bóru.



Obr. 6.1 Vlastnosti různých druhů řezných materiálů [25].

6.2 Nástrojové oceli

Obdobně jako na všechny nástrojové materiály jsou i na nástrojové oceli často kladeny vlastnosti, které si vzájemně odporují. U některých materiálů je požadována vysoká tvrdost, ale zároveň je nutné zachovat houževnatost. Toho se dosahuje vhodným tepelným zpracováním. Rozdělení nástrojových materiálů se obvykle dělá podle chemického složení [25]. V tabulce 6.1 jsou uvedeny základní vlastnosti nástrojových ocelí.

Tab. 6.1 Vlastnosti nástrojových ocelí [25].

Oceli	nelegované	legované	vysokolegované (rychlořezné)
Označení	19 0xx-19 2xx	19 3xx-19 7xx	19 8xx
Obsah uhlíku [%]	0,5-1,5	0,8-1,2	0,7-1,3
Obsah legujících prvků [%]	<1,0	10-15	>30
	desetiny	jednotky	až desítky
Legující prvky	Mn, Si, Cr	Cr, W, Mo, V, Mn, Si, Ni	W, Mo, Cr, V, Co
Kalící prostředí	Voda	Olej	vzduch
Tvrdost po kalení [HRC]	62-64	66	64-68

6.3 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK) vyrábí práškovou metalurgií. Základní princip spočívá v spékání (slinování) tvrdých karbidů některých kovů například Ti, W, Ta. Jako pojivo se nejčastěji používá kobalt. Základní rozdělení SK je do třech skupin [25, 26]:

- Skupina K: WC+Co+(TaC.NbC) - pro litiny, neželezné kovy, nekovové materiály,
- skupina P: WC+TiC+Co+(TaC.NbC) - pro feritické korozivzdorné oceli, uhlíkové oceli,
- skupina M: WC+TiC+TaC.NbC+Co - pro univerzální použití, lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli, tvárné litiny.

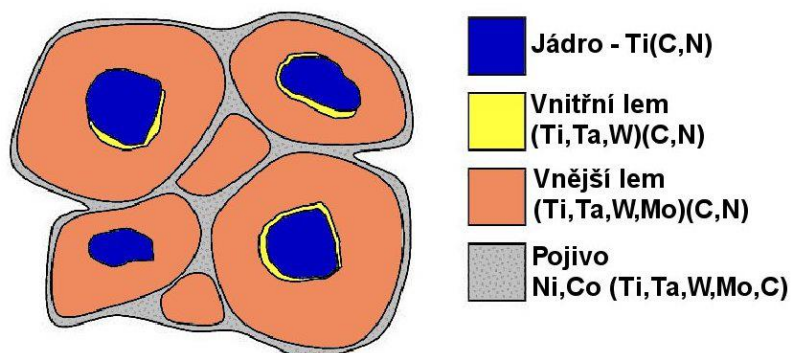
6.4 Řezná keramika

Keramika je převážně brána jako krystalický materiál složený z anorganických sloučenin nekovového charakteru. Patří zde i tradiční keramika (cihly, porcelán), ale v technické praxi se využívá tzv. „nová“ keramika, která obsahuje i amorfní látky. Základními druhy jsou oxidické (na bázi Al_2O_3) a nitridické (na bázi Si_3N_4). Výhodou řezné keramiky je [25]:

- vysoká tvrdost,
- chemická odolnost,
- vysoká tepelná odolnost,
- vysoká pevnost v tlaku.

6.5 Cermety

Cermety jsou slinuté karbidy, které se ale odlišují svou tvrdou fází. Základem cermetu je TiC (karbid titanu) nebo TiN (nitrid titanu). Tento materiál kombinuje vlastnosti keramiky (**CER**amics) a kovů (**MET**als). Vyznačuje se tedy vysokou tvrdostí, jakou má keramika, a velkou houževnatostí, jakou mají kovy. Obvyklé složení cermetu zobrazuje obr. 6.2 [25].



Obr. 6.2 Struktura cermetu [25].

6.6 Diamant

Polykrystalický diamant (PD) patří mezi super tvrdé řezné materiály. Diamant má nízkou teplotní stálost, při dosažení teploty 800°C se mění na grafit. Z toho důvodu nesmí být používán pro obrábění materiálů, které obsahují železo (ocel, litina). Při ohřevu by docházelo k velmi silné difúzi a následně k rychlému opotřebení nástroje. PD má široké využití pro obrábění neželezných materiálů. Například hliníkové slitiny, bronzy, mosazi, kompozity, ale i přírodní materiály jako jsou mramor a žula [25, 26].

6.7 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru (KNB) se vyznačuje vysokou tvrdostí a velkou pevností i za vysokých teplot (až 2000°C). Velkou nevýhodou KNB je nízká chemická odolnost a vysoká cena. Největší uplatnění je v oblasti obrábění kalených ocelí, které se dříve museli brousit [25, 26].

ZÁVĚR

V této bakalářské práci je obecně popsána technologie mikro-obrábění. Úvodem je popsáno základní rozdělení, popis velikostního efektu, dále rozbor mikro-frézování a popis simulačních metod průběhu napětí a deformací. Hlavní cílem práce je seznámení se základními typy výroby řezných nástrojů pro mikro-frézování a nástrojovými materiály.

V první části práce je definice a aplikace mikro-obrábění. Dále zde jsou popsány základní druhy mikro-obrábění, jako je mikro-frézování, mikro-vrtání, mikro-soustružení a mikro-broušení, jejich principy a využití. Hlavním problémem u mikro-obrábění je velikostní efekt („size effect“). U každé nástroje je důležitý poloměr špičky ostří, které určuje minimální hloubku řezu, která je potřeba, aby došlo ke tvorbě třísky. Pokud je hloubka řezu menší, než je minimální hloubka řezu, netvoří se tříska, ale materiál je vtlačován pod nástroj. Hlavními aplikacemi mikro-frézování je v oblasti v biomedicíně, jako výroba například zubních a kloubních náhrad, nebo v optickém průmyslu pro výrobu malých komponentů.

Hlavní částí práce je výroba řezných nástrojů pro mikro-frézování. Základní metodou výroby je broušení. Je to nenáročná metoda a její hlavní výhodou jsou poměrně nízké náklady na pořízení výrobních zařízení. Relativně novou technologií je metoda fokusovaného iontového svazku (FIB). Tento způsob výroby se vyznačuje vysokými pořizovacími náklady na zařízení pro tuto metodu. Naproti tomu poskytuje vysokou přesnost výsledné součásti. Princip elektroerozivní metody (EDM) je známý už řadu let, ale výrazný rozvoj nastal až s příchodem výpočetní techniky. Mezi výhody patří možnost obrábění jakéhokoliv vodivého materiálu bez mechanického namáhání. Pro povlakování nástrojů pro mikro-frézování je vhodná metoda HIPIMS. Touto metodou je možno dosáhnout velmi tenkých vrstev povlaku, která je u těchto nástrojů důležitá.

Materiály pro řezné nástroje mikro-frézování jsou obdobou materiálu používaných pro konvenční obrábění. Patří zde nástrojové oceli, slinuté karbidy, řezná keramika, cermety, diamant a kubický nitrid bóru. Z nichž značně používaný materiál je slinutý karbid, který poskytuje vysokou tvrdost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CHENG, K. (Kai) a Dehong HUO. *Micro-cutting: fundamentals and applications*. Chichester: Wiley, 2013, xvii, 348 stran : ilustrace. ISBN 978-0-470-97287-8.
2. WU, Xian, Liang LI a Ning HE. Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting. *Precision Engineering* [online]. Elsevier, 1701, **47**, 191-196 [cit. 2017-03-27]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.08.004. ISSN 0141-6359.
3. HOSSEINI, Seyed Vahid a Mehrdad VAHDATI. Modeling the effect of tool edge radius on contact zone in nanomachining. *Computational Materials Science* [online]. Elsevier B.V, 1212, **65**, 29-36 [cit. 2017-03-02]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2012.06.037. ISSN 0927-0256.
4. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/pages/default.aspx>
5. MIJUŠKOVIĆ, Goran, Peter KRAJNIK a Janez KOPAČ. Analysis of tool deflection in micro milling of graphite electrodes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, **76**(1-4), 209-217 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1007/s00170-013-5536-2. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5536-2>
6. JIN, Cheng-Zhe, Ik-Soo KANG, Jin-Hyo PARK, Su-Hoon JANG a Jeong-Suk KIM. The characteristics of cutting forces in the micro-milling of AISI D2 steel. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. Heidelberg: Korean Society of Mechanical Engineers, 0910, **23**(10), 2823-2829 [cit. 2017-04-02]. DOI: 10.1007/s12206-009-0804-7. ISSN 1738-494X.
7. AFAZOV, S.M., S.M. RATCHEV a J. SEGAL. Modelling and simulation of micro-milling cutting forces. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2010, **210**(15), 2154-2162 [cit. 2017-04-01]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.033. ISSN 0924-0136.
8. MAMEDOV, Ali, S.Ehsan LAYEGH K. a Ismail LAZOGLU. Machining Forces and Tool Deflections in Micro Milling. *Procedia CIRP* [online]. 2013, **8**, 147-151 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.080. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827113003570>
9. CHAIRS, General a ECKHARD BEYER AND RAJESH PATEL. *ICALEO 2002 congress proceedings, Laser Materials Processing Conference, Laser Microfabrication Conference*. [Elektronische Ressource]. Orlando, FL: Laser Institute of America, 2002. ISBN 0912035722.

10. PRATAP, Tej a Karali PATRA. Finite Element Method Based Modeling for Prediction of Cutting Forces in Micro-end Milling. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2017, **98**(1), 17-26. DOI: 10.1007/s40032-016-0232-2. ISSN 2250-0545. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40032-016-0232-2>
11. PETRUŠKA, J. Počítačové metody mechaniky II. VUT-FSI, Ústav mechaniky těles. Brno, 2003. 96 s. [vid. 15. Března 2017]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz>
12. ŠEDA, Pavel. *MKP pro rychlé simulace obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
13. AURICH, Jan C., Ingo G. REICHENBACH a Guido M. SCHÜLER. Manufacture and application of ultra-small micro end mills. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. Elsevier, 2012, **61**(1), 83-86 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.012. ISSN 0007-8506.
14. ZHAN, Zhongbo, Liang LI, Ning HE, Rong BIAN a Meng ZHAO. Design and manufacturing of ultra-hard micro-milling tool. *Transactions of Tianjin University* [online]. 2014, **20**(6), 415-421 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1007/s12209-014-2257-z. ISSN 1006-4982.
15. *Mikroobrábění fokusovaným iontovým svazkem* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/mikroobrabeni-fokusovany-m-iontovym-svazkem>
16. BARTOŠ, Radko. *Tvorba nanostruktur pomocí fokusovaného iontového svazku: bakalářská práce*. Brno, 2011. 28 s., Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Kolíbal, Ph.D.
17. ADAMS, David P., Michael J. VASILE, Gilbert BENAVIDES a Ann N. CAMPBELL. Micromilling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools. *Precision Engineering* [online]. Elsevier, 2001, **25**(2), 107-113 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00064-7. ISSN 0141-6359.
18. ALI, M. a A. ONG. Fabricating micromilling tool using wire electrodischarge grinding and focused ion beam sputtering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag, 0612, **31**(5), 501-508 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1007/s00170-005-0220-9. ISSN 0268-3768.

19. ŠAMOŘIL, Tomáš. *Aplikace fokusovaného iontového a elektronového svazku v nanotechnologiích*. 2015,
20. Drmela, Radim. *Aplikace elektroerozivního obrábění v kombinaci s frézováním*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 103 s. 12 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
21. SEDLÁČEK, J. *Drátové elektroerozivní obrábění při výrobě nástrojů na dřevo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 59 s, 6 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička.
22. HUMÁR, A. *Technologie obrábění – 3. část*. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2005
23. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4
24. EDM Swiss [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z:
<http://www.edmswiss.com/charmilles-robofil-2050si-2005-wire-cutting-edm-machine-by-customer.html>
25. HUMÁR, A., *Technologie 1, Technologie obrábění - 1.část* Studijní opory. VUT FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006.
26. LOJDA, JIŘÍ. *Aplikace řezných materiálů a jejich využití ve strojírenském průmyslu: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, květen 2008. 44 s., 9 příloh. Vedoucí práce Ing. Josef Sedlák.
27. BÖHLMARK, Johan, Ulf HELMERSSON a André ANDERS. *Fundamentals of High Power Impulse Magnetron Sputtering*. Institutionen för fysik, kemi och biologi, 2006. ISBN 91-85523-96-8. ISSN 0345-7524.
28. KEUNECKE, M., C. STEIN, K. BEWILOGUA, W. KOELKER, D. KASSEL a H. van DEN BERG. Modified TiAlN coatings prepared by d.c. pulsed magnetron sputtering. *Surface & Coatings Technology* [online]. Elsevier B.V, 2010, **205**(5), 1273-1278 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.09.023. ISSN 0257-8972.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CNC	[-]	computer numeric control
CVD	[-]	chemical vapor deposition
EDM	[-]	electric discharge machining
FEM	[-]	finite element method
FIB	[-]	focused ion beam
HIPIMS	[-]	high-power impulse magnetron sputtering
HV	[-]	tvrdost dle Vickerse
HRC	[-]	tvrdost dle Rockwella
KNB	[-]	kubický nitrid bóru
LMIS	[-]	liquid metal ion source
PD	[-]	polykrystalický diamant
PVD	[-]	physical vapour deposition
SEM	[-]	scanning electron microscope
SK	[-]	slinutý karbid
SPH	[-]	smoothed particle hydrodynamic method

Symbol	Jednotka	Popis
Ap	[mm]	hloubka obráběné plochy
D	[mm]	průměr nástroje
F	[N]	celková řezná síla
F_c	[N]	řezná síla
F_t	[N]	pasivní síla
Ra	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
f_z	[mm]	posuv na zub
n	[min ⁻¹]	hloubka řezu
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
σ	[MPa]	normálové napětí
τ	[MPa]	tečné napětí